

液压舵机伺服系统的专家 PID 控制

车冰博, 王平军, 熊 宽, 李彦波

(空军工程大学 航空航天工程学院, 西安 710038)

摘要: 为了更好地分析与优化液压舵机的控制性能, 根据控制理论建立了液压舵机伺服系统的数学模型; 针对采用常规控制方法液压舵机系统响应速度慢、抗干扰能力差等问题, 在对专家经验进行总结并获取 5 条控制规则后, 设计了专家 PID 控制器; 在单位阶跃信号的作用下, 运用 Matlab/Simulink 对该液压舵机系统进行仿真; 仿真结果表明, 与常规 PID 控制、P 控制相比, 专家 PID 控制使系统调节时间缩短了 0.104 s, 缩减幅度达 71%, 受到干扰后再次稳定的时间缩短了 0.034 s, 有效地提高了快速性和抗干扰性, 获得了良好的控制效果。

关键词: 液压舵机; 专家 PID 控制; 系统仿真

Expert PID Control of Hydraulic Actuator Servo System

Che Bingbo, Wang Pingjun, Xiong Kuan, Li Yanbo

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: In order to analyze and optimize the control performance of the hydraulic actuator better, the model of hydraulic actuator servo system is established based on control theories. Hydraulic actuator system based on conventional control method has low converging speed and low ability of anti-jamming. Aiming at these problems, expert experience is summarized and five control rules are got, then expert PID controller is designed. At last the hydraulic actuator system is simulated with Matlab/simulink under the effect of unit step signal. The result shows that compared with PID control and P control, expert PID control makes the accommodative time is cut by 0.104s, the cut extent attain 71%, and the time of accommodativeness after being got disturbance is cut by 0.034s. It effectively raises the rapidity and anti-disturbance of the system and gets a good control result.

Key words: hydraulic actuator; expert PID control; simulation of system

0 引言

舵机是飞机自动驾驶仪中的执行机构, 它的功用是按照放大器传来的控制信号, 以一定的输出速度和输出力推动飞机舵面^[1]。由于液压舵机伺服系统是一个高阶的复杂的非线性系统, 同时外界干扰、不同温度下液压油的弹性模量和粘性的变化等因素使得系统存在大量的不确定性, 这就很难建立舵机伺服系统的精确模型, 因此也就难以保证系统具有较好的快速性和抗干扰性。

为了提高舵机系统的快速性和抗干扰性, 国内外很多学者已经做了大量研究, 并对其进行了 PID 控制, 但是 PID 控制并没有有效地提高舵机系统的控制性能。

专家 PID 控制器利用人工智能的方法将操作人员的实践经验作为知识存入计算机中。这样, 根据现场实际情况, 计算机就能够自动调整 PID 参数。这种控制方法将操作人员(专家)长期实践积累的经验知识用控制规则模型化^[2], 就使得操作简单、快捷。

本文针对舵机伺服系统控制性能的要求, 参考飞行员的操作经验, 提出采用专家 PID 控制来控制舵机伺服系统。仿真结果表明专家 PID 控制不仅可以确保控制系统的稳定性和鲁

棒性, 而且可以有效地提高系统的响应速度。

1 液压舵机伺服系统数学模型的建立

某型飞机液压舵机伺服系统为四余度电液伺服阀控制, 在系统电液伺服阀没有发生故障时, 该伺服系统可以简单地看成由两级伺服放大器、小舵机(包括电液伺服阀、液压放大器、主控阀阀芯)、小舵机反馈传感器、小舵机反馈传感器解调器、大作用筒、大作用筒反馈传感器及大作用筒反馈传感器解调器组成的两级闭环控制系统。在此基础上可以得到液压舵机伺服系统的结构方框图, 如图 1 所示^[3]。

1.1 电液伺服阀传递函数

由于液压舵机的工作频率一般都在 20 Hz 以下的低频段, 因此惯性环节足以精确地表示伺服阀的动态响应。经过推算, 电液伺服阀的传递函数可以表示为:

$$\frac{x_V(s)}{e_g(s)} = \frac{K_{QSV}}{T_{QSV}s + 1} \quad (1)$$

式(1)中, K_{QSV} 为电液伺服阀的流量增益; T_{QSV} 为时间常数。

查找有关技术手册知 $K_{QSV} = 2410 \text{ mm}^3/\text{s}/\text{mA}$, $T_{QSV} = 0.00235 \text{ s}$, 由此可得电液伺服阀的传递函数为:

$$W_{ef}(s) = \frac{K_{QSV}}{T_{QSV}s + 1} = \frac{2410}{0.00235s + 1} \quad (2)$$

1.2 主控阀和大作用筒传递函数

主控阀是由受电液伺服阀控制的小活塞和主控阀阀芯组成。主控阀的阀芯控制分配两个液压系统的流量, 进而控制双腔串联作动筒的运动。小活塞控制主控阀的开度, 进而实现电液伺服阀对流量的控制, 最终实现液压放大器的功能。因此, 主控阀可以进一步简化成平板滑阀的结构模型。

收稿日期: 2013-10-12; 修回日期: 2013-12-27。

作者简介: 车冰博(1990-), 男, 陕西富平人, 硕士研究生, 主要从事流体传动与控制方向的研究。

王平军(1964-), 男, 河北保定人, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事流体传动与控制方向的研究。

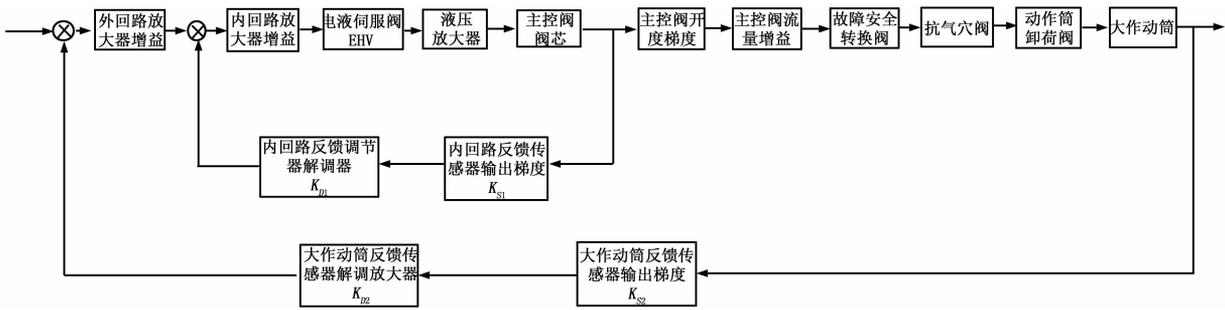


图 1 液压舵机伺服系统的结构方框图

主控阀输出流量方程为^[4]:

$$Q_f = \frac{\partial Q_f}{\partial x_v} x_v + \frac{\partial Q_f}{\partial p_f} p_f = K_Q x_v - K_c p_f \quad (3)$$

式 (3) 中, x_v 为阀芯位移 (mm), p_f 为小活塞负载压力差 (kg/cm^2), K_Q 为主控阀空载的流量增益 (mm^3/s), K_c 为主控阀的综合静特性的弹性系数 ($\text{mm}^5/\text{kg} \cdot \text{s}$)。

不考虑弹性负载、管道损失和阻尼负载, 并且认为大作动筒的时间常数与主控阀的时间常数相当, 可得到主控阀和大作动筒的传递函数如下:

$$W_{ZT}(s) = \frac{1}{s \left(\frac{m_t K_{ce}}{A_t^2} s + 1 \right)} \quad (4)$$

式 (4) 中, A_t 为作动筒活塞的有效面积 (mm^2), m_t 为活塞和负载折算到活塞上的总质量 ($\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{mm}$), K_{ce} 为总弹性系数 ($\text{mm}^5/\text{kg} \cdot \text{s}$), $\frac{m_t K_{ce}}{A_t^2}$ 为作动筒一负载的相对阻尼系数。

由于在建模时, 舵机处于空载的状态, 因此作动筒一负载的相对阻尼系数为零, 作动筒的传递函数可进一步简化为:

$$W_{ZT}(s) = \frac{1}{A_t s} \quad (5)$$

查找有关技术手册知, 主控阀阀芯的有效面积 $A_1 = 71.6 \text{ mm}^2$, 大作动筒活塞的有效面积 $A_2 = 4\ 210 \text{ mm}^2$, 由此可得:

主控阀的传递函数为:

$$W_{eT}(s) = \frac{1}{A_1 s} = \frac{1}{71.6 s} \quad (6)$$

大作动筒的传递函数为:

$$W_{dL}(s) = \frac{1}{A_2 s} = \frac{1}{4\ 210 s} \quad (7)$$

根据相关的技术手册, 得到舵机伺服系统的相关参数如下: 外回路伺服放大器增益 $14.5 \pm 10\% \text{ V/V}$; 内回路伺服放大器增益 $4 \pm 10\% \text{ V/V}$; 内回路反馈传感器输出梯度 $6.67 \pm 10\% \text{ V/mm}$; 内回路反馈传感器解调器放大系数 1.2 V/mm ; 主控阀开度梯度 2 deg/mm ; 主控阀流量增益 $7.6 \times 10^4 \text{ mm}^3/(\text{deg}) \cdot \text{s}$; 大作动筒反馈传感器输出梯度 $6.67 \pm 10\% \text{ V/mm}$; 大作动筒反馈传感器解调器放大系数 0.85 V/mm 。

将以上参数带入液压舵机方框图, 经梅森公式推算得液压舵机开环传递函数为^[5-6]:

$$G(s) = \frac{4.826 \times 10^7 s + 2.054 \times 10^{10}}{119.2 s^4 + 101\ 400 s^3 + 3.425 \times 10^7 s^2 + 5.391 \times 10^9 s} \quad (8)$$

至此, 整个液压舵机的数学模型就建立好了, 通过对该模型进行仿真分析, 就可以从理论上了解、掌握舵机的基本性能, 以此对实际应用中遇到的问题做一指导和参考。由该数学模型可以看出, 液压舵机系统是一个复杂的非线性系统, 因此为了保证飞行安全, 设计出更优良的控制器就成了实际工作中需要解决的重点和难点。

2 专家 PID 控制器设计与仿真

2.1 PID 控制的仿真分析

由图 1 可知, 外回路增益相当于比例控制器, 因此可以将液压舵机伺服系统看成是比例控制。现在建立液压舵机在 Simulink 中的 PID 整定结构图如图 2 所示^[7]。

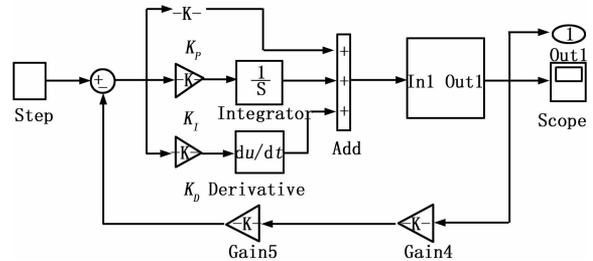


图 2 舵机的 PID 整定 Simulink 仿真模型

在图 2 中, 先令 $K_I = K_D = 0$, 调整 K_P 的大小, 直到得到等幅振荡时为止。可得 $K_P = 34$, $T_k = 0.1 \text{ s}$, 从而得到整定后的参数 $K_P = \frac{34}{1.67} = 20.36$, $T_I = 0.5 T_k = 0.05 \text{ s}$, $T_D = 0.125 T_k = 0.0125 \text{ s}$ 。将得到的参数在经过适当的调整修正后可得: $K_P = 20.36$, $K_I = 1.2$, $K_D = 0.4$ 。设置仿真求解器为 ode45, 仿真时间为 0.5 s , 最大仿真步长设置为 0.001 , 其他参数取系统默认值, 得到 PID 控制的液压舵机单位阶跃响应曲线如图 3 所示。

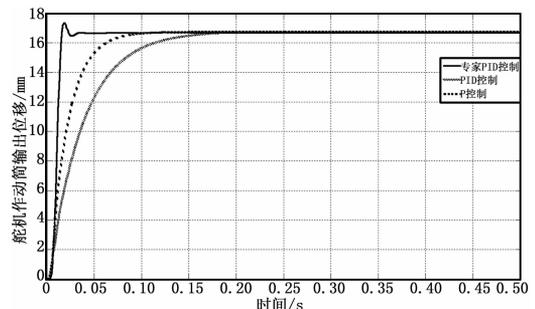


图 3 液压舵机单位阶跃响应曲线

2.2 专家 PID 控制的仿真分析

专家 PID 控制的本质其实是以专家长期总结的经验为基础来整定 PID 参数。它以被控系统本身的一些特点及相关的控制规律为基础, 而不要求出被控制系统的精确数学模型, 是一类直接型的控制器。

典型的线性系统单位阶跃响应误差曲线如图 4 所示^[8-9]。

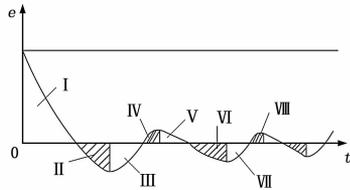


图 4 典型线性系统阶跃响应误差曲线

令 $e(k)$ 表示离散化的当前采样时刻的误差值, $e(k-1)$ 、 $e(k-2)$ 分别表示前一个和前两个采样时刻的误差值, 则有

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$$

$$\Delta e(k-1) = e(k-1) - e(k-2) \quad (9)$$

参考相关文献^[10-12], 根据误差及其变化, 对如图 4 所示的单位阶跃响应误差曲线进行如下定性分析, 获取专家控制规则。

(1) 当 $|e(k)| > M_1$ 时, 说明误差的绝对值已经很大。不论误差变化趋势如何, 都应考虑控制器的输出应按最大 (或最小) 输出, 以达到迅速调整误差, 使误差绝对值以最大速度减小。此时, 它相当于实施开环控制。

(2) 当 $e(k)\Delta e(k) > 0$ 时, 说明误差在向误差绝对值增大方向变化, 或误差为某一常值, 未发生变化。

如果 $|e(k)| \geq M_2$, 说明误差也较大, 可考虑由控制器实施较强的控制作用, 使达到扭转误差绝对值朝减小方向变化, 并迅速减小误差的绝对值, 控制器输出为:

$$u(k) = u(k-1) + k_1 \{k_p [e(k) - e(k-1)] + k_i e(k) + k_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]\} \quad (10)$$

如果 $|e(k)| < M_2$, 说明尽管误差朝绝对值增大方向变化, 但误差绝对值本身并不很大, 可考虑控制器实施一般的控制作用, 扭转误差的变化趋势, 使其朝误差绝对值减小方向变化, 控制器输出为:

$$u(k) = u(k-1) + k_p [e(k) - e(k-1)] + k_i e(k) + k_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (11)$$

(3) 当 $e(k)\Delta e(k) < 0$ 、 $\Delta e(k)\Delta e(k-1) > 0$ 或者 $e(k) = 0$ 时, 说明误差的绝对值朝减小的方向变化, 或者已经达到平衡状态。此时, 可考虑采取保持控制器输出不变。

(4) 当 $e(k)\Delta e(k) < 0$ 、 $\Delta e(k)\Delta e(k-1) < 0$ 时, 说明误差处于极值状态。如果此时误差的绝对值较大, 即 $|e(k)| \geq M_2$, 可考虑实施较强的控制作用:

$$u(k) = u(k-1) + k_1 k_p e_m(k) \quad (12)$$

如果此时误差的绝对值较小, 即 $|e(k)| < M_2$, 可考虑实施较弱的控制作用:

$$u(k) = u(k-1) + k_2 k_p e_m(k) \quad (13)$$

(5) 当 $|e(k)| \leq \epsilon$ 时, 说明误差的绝对值很小, 此时加入积分环节, 以减少稳态误差。

式 (10) ~ (14) 中, k 为控制周期的序号 (自然数), $e_m(k)$ 为误差 e 的第 k 个极值, $u(k)$ 为第 k 次控制器的输出,

$u(k-1)$ 为第 $k-1$ 次控制器的输出, k_1 为增益放大系数, $k_1 > 1$; k_2 为抑制系数, $0 < k_2 < 1$, M_1 、 M_2 为设定的误差极限, $M_1 > M_2 > 0$, ϵ 为任意小的正实数。

在图 4 中, I、III、V、VII、... 区域, 误差朝绝对值减小的方向变化, 此时, 可采取保持等待措施, 相当于实施开环控制; II、IV、VI、VIII、... 区域, 误差绝对值朝增大的方向变化, 此时, 可根据误差的大小分别实施较强或一般的控制作用, 以抑制动态误差。

本文设计的专家 PID 控制器用 Matlab 的 M 函数来编写。在仿真过程中, ϵ 取 0.001, $M_1 = 0.8$, $M_2 = 0.05$, $k_1 = 2$, $k_2 = 0.6$, 程序中的 5 条规则与控制算法的 5 种情况相对应。设定仿真时间为 0.5 s, 输入是起始时间为 0 时刻, 终值为 1 的阶跃信号, 经调试、运行后, 仿真结果如图 3 所示。

3 结果分析

为了方便地对所得到的仿真结果进行对比、分析, 我们将 P 控制、PID 控制、专家 PID 控制的仿真曲线放在同一窗口内, 如图 3 所示。

从图 3 中可以看出, 与常规的 P 控制和 PID 控制相比, 专家 PID 控制的上升时间明显缩短, 大大提高了系统的快速响应能力; 而且 P 控制、PID 控制、专家 PID 控制使系统达到稳定的调节时间分别为 0.235 s、0.146 s、0.042 s, 可见专家 PID 控制使系统的调节时间明显缩短。

为了分析专家 PID 控制抑制干扰的能力, 在 0.3 s 给液压舵机系统施加一幅值为 2 的阶跃干扰, 仿真结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出, P 控制、PID 控制、专家 PID 控制在受到阶跃干扰后使系统恢复稳定的时间分别为 0.175 s、0.096 s、0.062 s, 专家 PID 控制在受到阶跃干扰后恢复稳定的时间明显缩短, 具有较强的抗干扰能力。

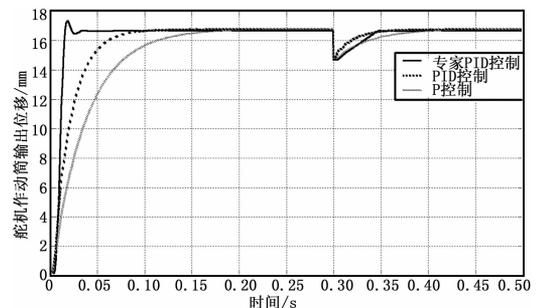


图 5 液压舵机加入阶跃干扰后的响应曲线

4 结论

由于液压舵机伺服系统是一个高阶的非线性复杂系统, 为保证飞行安全, 使用常规的控制方法很难保证系统具有较好的快速性和抗干扰性。本文在总结专家经验获取专家控制规则的基础上, 设计了一种新型的专家 PID 控制器, 并将其应用于液压舵机伺服系统。仿真结果表明: 在单位阶跃信号的作用下, 与传统的 PID 控制、P 控制相比, 专家 PID 控制能够明显地提高系统的快速性, 并使系统具有较强的抗干扰能力, 能够更好地保证飞机的飞行安全, 具有较强的应用前景。

(下转第 1805 页)

